



Lu, Xiaonan; Sun, Kai; Guerrero, Josep M.; Huang, Lipei

Published in:
Diangong Jishu Xuebao

Publication date:
2013

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., & Huang, L. (2013). . *Diangong Jishu Xuebao*, 28(4), 35-42.
<http://read.cqvip.com/site/detail.aspx?sid=10179&lngid=45805225>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统研究

陆晓楠¹ 孙凯¹ Josep Guerrero² 黄立培¹

1. 清华大学电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室北京 100084

2. 丹麦奥尔堡大学能源技术系奥尔堡丹麦 9220

摘要 为了改进交直流混合微电网中直流侧的母线电压性能,本文提出了直流分层控制系统,以在各接口变换器之间合理分配直流负荷,同时补偿下垂控制带来的直流母线电压跌落。所介绍的分层控制系统包括两层:第一层控制直流母线电压和交流电流,同时通过下垂控制实现直流侧的负荷功率分配;第二层补偿下垂控制带来的电压跌落,进一步提升母线电压质量。在第二层控制中,采用了具有低带宽通信特点的公共控制器,满足了微电网分布式结构的需要。本文给出了各控制层的具体设计方法。同时,对第二层控制的低带宽通信特性进行了具体的理论分析。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

关键字: 混合微电网 并联接口变换器 分层控制

中图分类号: TM727

DC Hierarchical Control System for Microgrid Applications

Lu Xiaonan¹ Sun Kai¹ Guerrero Josep² Huang Lipei¹

1. State Key Lab of Power Systems Tsinghua University Beijing 100084 China

2. Department of Energy Technology Aalborg University Aalborg 9220Denmark

Abstract In order to enhance the DC side performance of AC-DC hybrid microgrid, a DC hierarchical control system is proposed in this paper. To meet the requirement of DC load sharing between the parallel power interfaces, droop method is adopted. Meanwhile, DC voltage secondary control is employed to restore the deviation in the DC bus voltage. The hierarchical control system is composed of two levels. DC voltage and AC current controllers are achieved in the primary control level. At the same time, droop method for DC side is adopted to reach load sharing. Secondary control level is employed to restore the deviation caused by droop control. Common PI controller with low bandwidth communication is used in the secondary control level, which meets the requirement of the distributed characteristic in the microgrid system. In this paper, the detailed design method for each control level is introduced. Theoretical analysis of the low bandwidth characteristic of secondary control level is also realized. Theoretical results are validated by both simulation and experiment.

Keywords: Hybrid microgrid, parallel interface converter, hierarchical control

1. 引言

随着工业生产的不断进步,传统的化石燃料已经无法满足生产力发展的要求。与此同时,由于可再生能源具有储量丰富,清洁无污染等多方面的优点,近年来得到了学术界和工业界的普遍关注^[1-2]。为了提升可再生能源在现代电力系统中的比例,学

者们引入了微电网的概念,以实现多个新能源单元的整合^[3]。具体来讲,引入微电网的概念后,可以在一定区域内,将多种新能源发电形式集合在一起,使其对内实现各发电单元的合理连接,协调负荷能量在新能源输入端之间的分配,形成可独立运行的小型电网;对外表现为电能的受控单元,可控的实现本地微电网和公共大电网之间的能量交换

[4]。

由于传统的公共大电网具有交流形式，对于微电网的研究往往集中在交流微电网上。而在实际的微电网系统中，往往同时存在交流和直流两条母线，分别和微电网中的交流和直流部分相连，即形成交直流混合微电网^[5]。因此，在对其中的交流部分进行研究的同时，需要对其中的直流环节进行分析。

在微电网系统中，为了实现电源和负荷之间的连接，通常需要利用电力电子变换器作为接口进行电能形式的变换^[6]。由于新能源发电形式具有分布式特点，因此各接口变换器之间形成并联连接结构，负荷功率需要根据接口变换器的功率等级进行合理分配^[7-8]。学者们提出了集中控制、主从控制、电流链控制和平均电流控制等多种方法实现负荷功率在各并联变换器之间的分配，但上述控制方法大多需要依赖高频通信线实现电流指令信号的传输^[9-12]。高频通信线一方面会降低系统的可靠性，提升系统维护成本，另一方面也无法满足微电网中分布式结构的需要。即使通过对一些传统的方法进行改造，可以采用低带宽通信取代高频通信，但所设计的控制器往往适用于纯交流系统或纯直流系统，对于交直流混合系统的研究较少。为了满足微电网中分布式结构要求，学者们将下垂控制引入到微电网接口变换器控制当中，通过本地控制实现均流。下垂控制系统无需高频通信线进行信号传输，系统可靠性和冗余度较高，满足分布式发电的要求，然而其在实现负荷功率分配的同时，会带来母线电压的跌落，降低了电压质量。在常规的应用中，常采用折衷的办法，即在电压偏差不超过可接受范围的情况下选取下垂系数，实现负荷均流^[8]。这样的方法会造成下垂控制的局限性，在一定程度上降

低了电流分配的准确性。

本文针对交直流混合微电网系统中直流部分的离网运行提出了直流分层控制系统。该控制系统实现了本地电压和电流的分布式控制。通过直流侧下垂控制方法实现了直流负荷在不同接口变换器之间的均等分配。同时，采用具有低带宽通信的母线电压公共二次控制器，对下垂控制带来的直流母线电压跌落进行补偿，在保证负荷分配的同时提升了母线电压质量。同时，和一些已有的基于低带宽通信的并联变换器控制系统相比，上述公共二次控制器具有较大的灵活性，通过选取控制器的作用位置，可以对系统中指定的母线电压进行补偿，以灵活的提升系统电压质量。

2. 直流分层控制系统设计

典型的 AC-DC 混合微电网结构如图 1 所示，其中母线间接口变换器满足并联关系，各分布式单元同样通过接口变换器接入母线^[5]。针对交直流混合微电网中直流部分设计的分层控制系统结构如图 2 所示。其中包含两层结构。第一层控制采用分布式控制方式，对每台接口变换器的直流输出电压和交流电流进行控制。其中，直流电压控制器的输出量通过乘以相角的正弦和余弦得到 α 轴和 β 轴的并网电流给定值，实现对网侧电压的单位功率因数跟踪。并网电流采用比例-谐振控制器进行控制，实现零稳态误差电流跟踪。采用谐振控制器形式的谐波补偿环节，降低系统谐波分量。同时，通过直流下垂控制实现直流侧负荷在不同变换器之间的分配。第二层控制采用具有低带宽通信特性的公共控制器，实现对直流母线电压跌落的补偿，提高本地电压质量。下面具体对各层控制进行介绍。

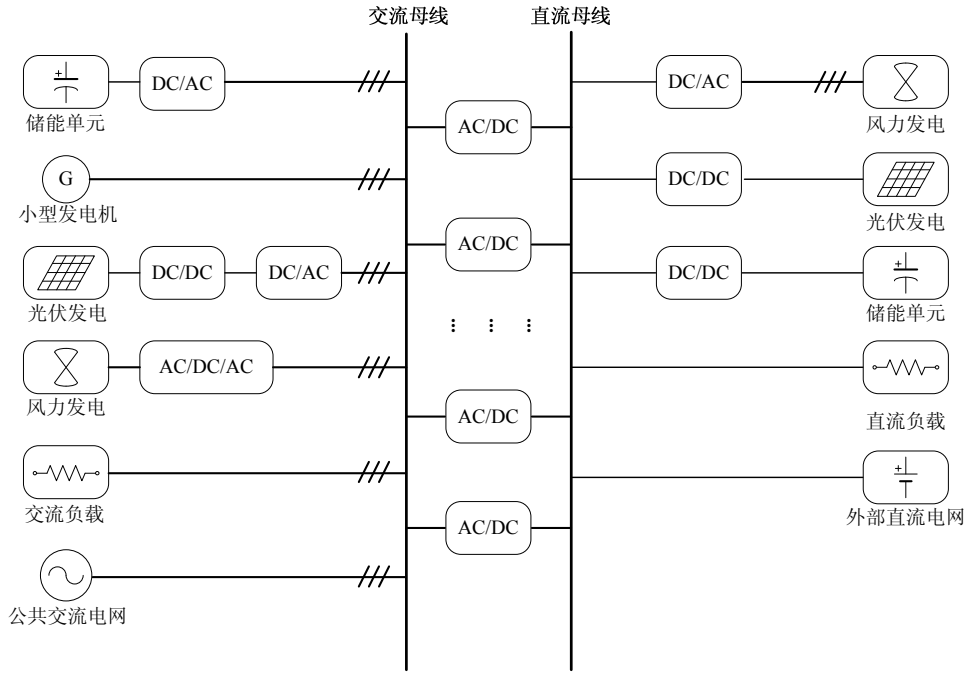


图 1 典型交直流混合微电网结构
Fig.1 Typical structure of a hybrid AC-DC microgrid

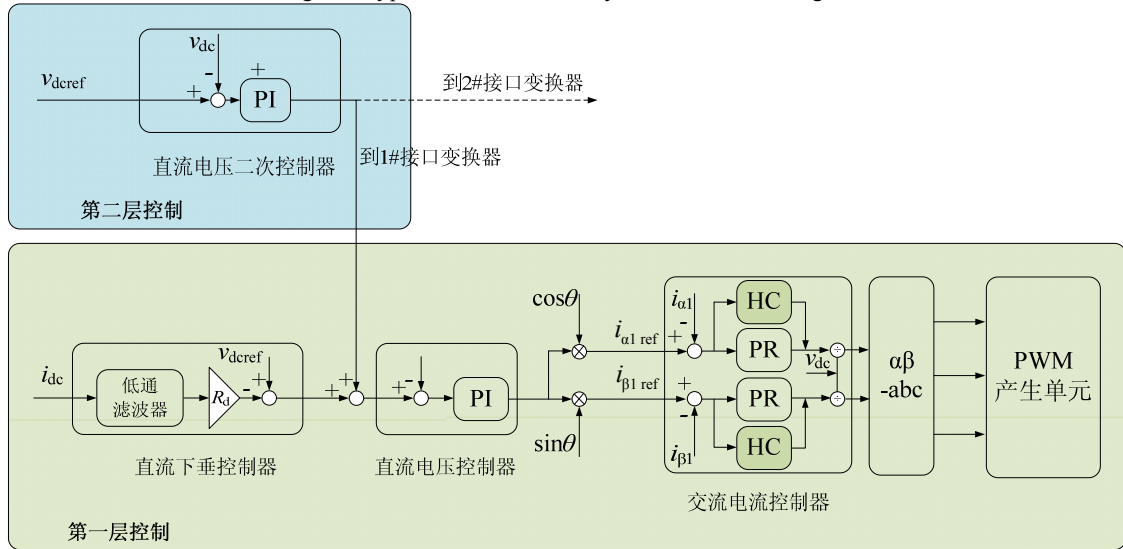


图 2 直流分层控制系统结构
Fig.2 Structure of the DC hierarchical control system

2.1. 第一层控制

第一层控制首先实现对交直流混合微电网系统中交流电流和直流电压的控制。交流电流环的控制结构如图 3 所示。其中， G_{pr} 为交流电流比例-谐振控制器， G_d 为代表变换器的延迟环节， G_f 为 LCL 滤波器传递函数。上述三者的表达式如式 (1)~(3) 所示。

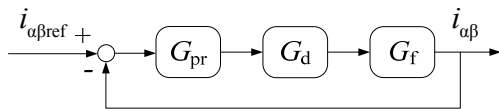


图 3 交流电流环结构框图
Fig.3 Control structure of the AC current loop

$$G_{pr} = K_{pc} + \frac{K_{rc}s}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

其中， K_{pc} 和 K_{rc} 分别为电流控制器的比例项和谐振项系数， ω 为谐振频率。

$$G_d = \frac{1}{1 + 1.5T_s \cdot s} \quad (2)$$

其中， T_s 为开关周期。

$$G_f = \frac{1 + R_{damp}C_f s}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)R_{damp}C_f s^2 + (L_1 + L_2)s} \quad (3)$$

其中， R_{damp} 为阻尼电阻， L_1 和 L_2 为 LCL 滤波器电感参数， C_f 为滤波器电容参数。

为了提升交流电流质量，引入了基于谐振控制器的谐波补偿环节，其结构如式 (4) 所示。

$$G_{Hch} = \frac{K_{th}s}{s^2 + (h\omega)^2} \quad (h=5,7,\dots) \quad (4)$$

其中, K_{rh} 为谐波补偿环节的谐振系数, h 为谐波次数。

设置电流环相角裕度大于 50° , 调整 PI 参数得到 $K_{pc} = 16$, $K_{rc} = 4000$ 。同时, 按照对应的谐波标准要求^[13], 控制交流电流低频段各奇次谐波含量不

超过 4%, 且 THD 不超过 5%, 则 5、7 次谐波补偿环节的谐振系数均设置为 400。此时, 电流控制环的根轨迹如图 4 所示, 其中闭环主导极点取值亦标注在根轨迹图上。可以看出, 闭环极点均位于左半平面, 电流环稳定性得以保证。

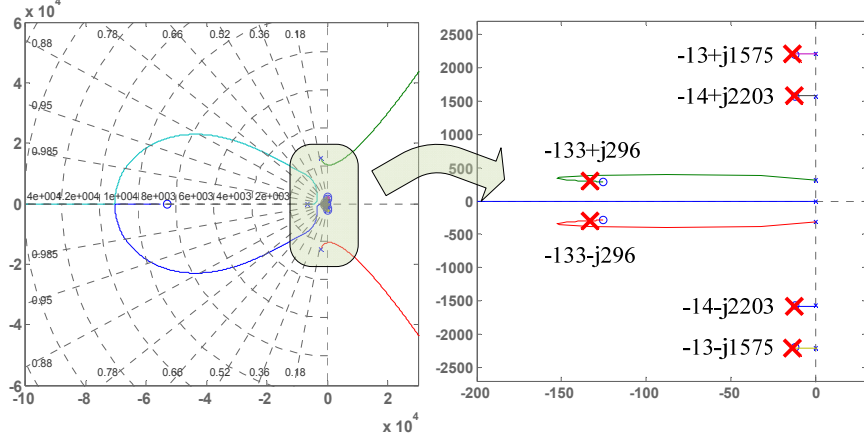


图 4 交流电流环根轨迹

Fig.4 Root locus plot of the AC current loop

直流电压控制采用比例-积分控制器, 以其作为控制外环, 交流电流环作为控制内环, 实现直流电压和交流电流的双闭环控制。直流电压环的控制结构如图 5 所示。其中, G_{pi} 为直流电压比例-积分控制器, G_c 为电流环传递函数, $G_{dcplant}$ 为用于连接变换器交流电流和直流电压的传递函数, 其表达式可通过功率守恒得出。具体来讲, 在不考虑变换器损耗的情况下, 变换器交直流两侧满足功率守恒关系, 如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} e_d i_d + e_q i_q &= v_{dc} \cdot (i_c + i_L) \\ &= v_{dc} \cdot C \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} \cdot i_L \end{aligned} \quad (5)$$

其中, e_d , e_q 分别为交流侧电压的 d、q 轴分量, v_{dc} 为直流电压, i_c 和 i_L 分别为直流侧电容电流和负载电流, C 为直流电容。

将式 (5) 进行小信号分析, 并将结果转换到 s 域, 可以得到

$$\begin{aligned} E_d \hat{i}_d + I_d \hat{e}_d + E_q \hat{i}_q + I_q \hat{e}_q \\ = (I_L + sCV_{dc}) \cdot \hat{v}_{dc} + V_{dc} \hat{i}_L \end{aligned} \quad (6)$$

若交流侧电压三相对称, 且满足单位功率因数, 在只考虑 d 轴电流干扰的情况下, 解得

$$\hat{v}_{dc} / \hat{i}_d = E_d / (I_L + sCV_{dc}) \quad (7)$$

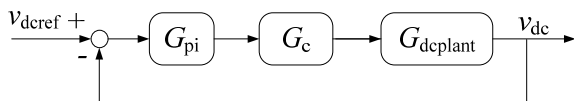


图 5 直流电压环结构框图

Fig.5 Control structure of the DC voltage loop

同样设计电压环相角裕度大于 50° , 调整 PI 控制器参数得到其控制器比例系数和积分系数分别为 1.3 和 6。此时的电压环根轨迹如图 6 所示, 其中闭环主导极点取值亦标注在根轨迹图上。从图 6 可以看出, 所有主导极点均位于左半平面, 直流电压环处于稳定状态。

在第一层控制中, 在完成了交流电流和直流电压控制器设计之后, 引入了直流侧 $V-I$ 形式的下垂控制方式, 实现直流负荷功率在并联变换器之间的分配。在设计下垂控制器的过程中, 需要对下垂系数进行选择, 其原则在于保证直流母线电压跌落不能超过其最大跌落值, 如式 (8) 所示。

$$I_{dc(FL)} R_d \leq (u_{dcmax} - u_{dc(margin)}) - (u_{dcmin} + u_{dc(margin)}) \quad (8)$$

其中, $I_{dc(FL)}$ 表示直流侧满负荷情况下的输出电流, R_d 表示下垂系数, u_{dcmax} 和 u_{dcmin} 表示直流电压的最大值和最小值, $u_{dc(margin)}$ 表示直流电压取值裕度。

因此, 可以得出

$$R_d \leq R_{dmax} = (u_{dcmax} - u_{dcmin} - 2u_{dc(margin)}) / I_{dc(FL)} \quad (9)$$

2.2. 第二层控制

在第一层控制中引入了直流侧 $V-I$ 形式的下垂控制器实现直流负荷功率在并联变换器之间的分配后, 会引入直流电压上的跌落, 降低直流母线电压质量。为了在实现负荷均流的同时补偿直流母线电压跌落, 设计了第二层控制, 其采用公共 PI 控制器, 通过低带宽通信线对直流母线电压进行二次控

制，提升母线电压至正常水平。为了保证引入二层控制器后系统具有足够的稳定裕度，二次电压 PI 控制器的比例和积分系数分别取为 0.003 和 13。为了模拟第二层控制的低带宽通信特性，在控制结构

中引入了延迟环节，该延迟环节和二次控制 PI 控制器直接相连，如图 7 所示。通过设置不同的延迟时间，可以模拟二次控制的通信带宽。

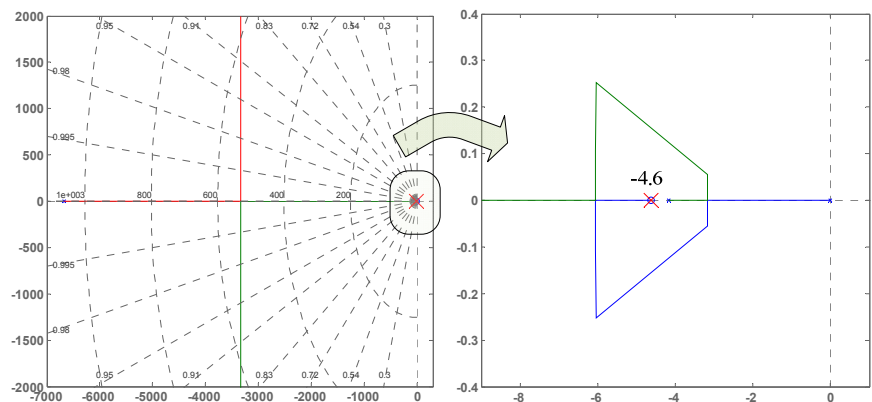


图 6 直流电压环根轨迹
Fig.6 Root locus plot of the DC voltage loop

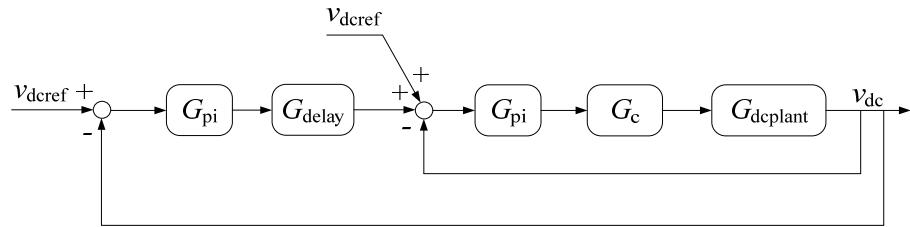


图 7 二次控制结构图
Fig.7 Control structure of secondary control

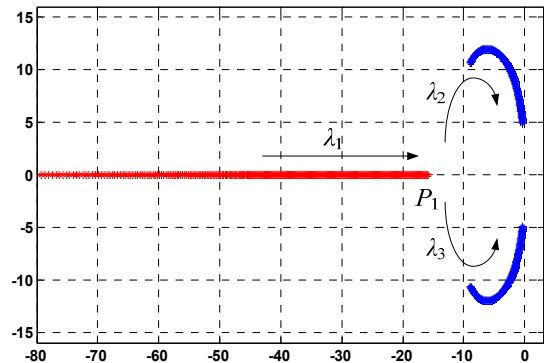


图 8 不同通信带宽下第二层控制闭环主导极点的分布情况

Fig.8 Close-loop dominant poles of secondary control level with different communication bandwidth

在改变延迟时间，即改变通信带宽的情况下，二次控制闭环系统主导极点变化情况如图 8 所示。从图 8 可以看出，当延迟时间加大，即通信带宽降低时，闭环主导极点 λ_1 向虚轴移动，而最终收敛在实轴负半轴。与此同时，主导极点 λ_2 和 λ_3 趋向于虚轴。值得注意的是，即使当延迟时间增大至 0.02s 时，即通信带宽低至约 50Hz 时， λ_2 和 λ_3 的取值为 $-6.9 \pm j11.9$ ，系统仍具有一定的稳定裕度。因此，二次控制的稳定性得以保证。

系统的性能。主回路参数如表 1 所示。

3. 仿真和实验验证

为了验证上述直流分层控制系统的有效性，建立了 Matlab/Simulink 仿真模型，验证直流分层控制

表 1 主回路参数
Tab. 1 Main power circuit parameters

参数	取值	单位
交流电压 (有效值)	230	V
交流频率	50	Hz
直流参考电压	700	V

直流负载	400	Ω
交流滤波器电感	1.8	mH
交流滤波器电容	4.7	μF
直流母线电容	600	μF
开关频率	8	kHz

首先对第一层控制进行测试。在不开启下垂控制的情况下，当直流母线电压给定值从 680V 跳变为 700V 时，直流电压暂态响应如图 9 所示。对应的交流电流暂态响应波形如图 10 所示。从图中可以看出，直流电压和交流电流控制器满足要求。

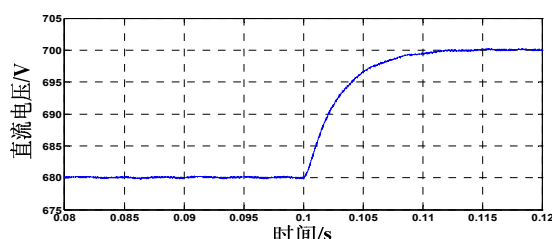


图 9 直流电压给定值跳变波形
Fig.9 Step reference waveform of DC voltage

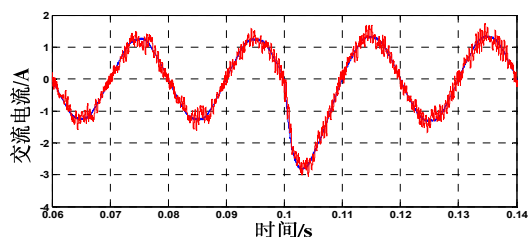
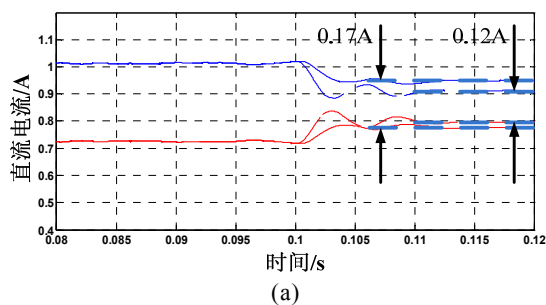
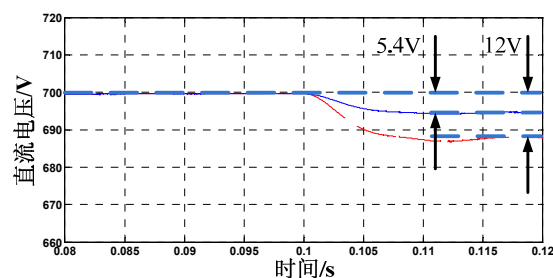


图 10 直流电压给定值跳变时对应的交流电流波形
Fig.10 AC current waveform with step DC reference voltage

在检测直流电压和交流电流控制器的基础上，开启每个变换器的下垂控制，得到均流效果如图 11 所示。图 11 中，在 $t=0.1\text{s}$ 之前，下垂控制未开启；而在 $t=0.1\text{s}$ 之后，下垂控制开启。图中实线波形对应的下垂系数为 6，而虚线波形对应的下垂系数为 12。从图中可以看出较大的下垂系数对应较高的均流准确度，而同时会带来较大的直流母线电压跌落。



(a)



(b)

图 11 不同下垂系数情况下的均流效果和母线电压跌落情况

(a) 直流输出电流波形 (b) 直流电压跌落波形
Fig.11 Local DC current sharing and voltage deviation waveforms with different droop coefficients

(a) Local DC output current waveforms (b) DC voltage deviation waveforms

在对第一层控制进行验证之后，第二层控制的验证结果如图 12 所示。由于下垂控制的影响，在启动第二层控制之前，直流电压产生跌落。当 $t=0.1\text{s}$ 时，启动第二层控制，将直流母线电压补偿到给定值水平。同时，第二层控制器的负载扰动响应可以通过直流侧负载电阻跳变进行测试。当直流负载从 400Ω 跳变为 133Ω 时，直流电压的暂态波形如图 13 所示。从图中可以看出，在经过一段暂态过程之后，直流电压恢复给定值水平。为了验证第二层控制的低带宽通信特性，给出了二次 PI 控制器的输出波形，如图 14 所示。此处可以看出，在低带宽通信的影响下，二次 PI 控制器输出阶梯状波形，但直流母线电压的补偿性能仍然可以得到保证。

综上所述，分层控制系统的协调控制得以验证。

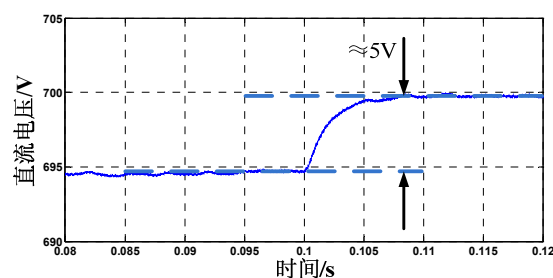


图 12 第二层控制作用下直流母线电压的补偿波形
Fig.12 DC voltage restoration waveform by secondary control

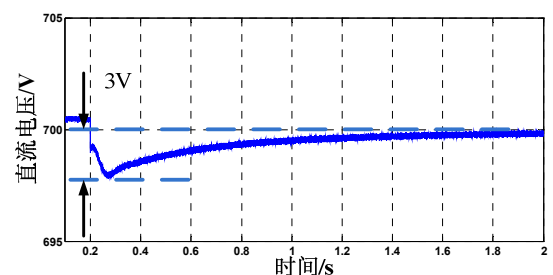


图 13 负载扰动下直流母线电压的暂态波形
Fig.13 DC voltage transient waveform with load disturbance

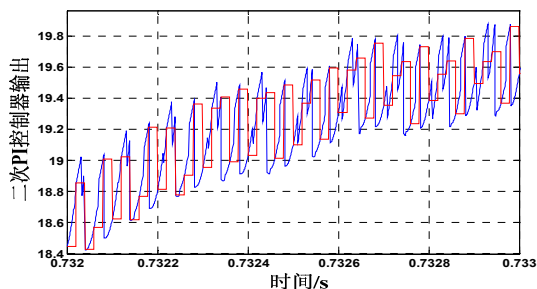


图 14 二次 PI 控制器输出波形

Fig.14 Output waveform of secondary PI controller

在进行仿真验证之后，搭建了 $2 \times 2.2 \text{ kW}$ 的并联变换器样机对理论分析进行实验验证。样机结构如图 15 所示。

仍然首先对第一层控制进行验证。在未开启下垂控制的情况下，直流电压的指令值阶跃波形如图 16 所示，对应的交流电流暂态波形如图 17 所示。从图 16 和 17 可以看出，直流电压和交流电流控制器满足要求。

在开启下垂控制的情况下，得到的直流输出电流波形如图 18 所示。从图中可以看出，直流负荷

均流效果较为理想，下垂控制效果得以验证。在上述下垂控制的作用下，直流母线电压产生跌落，其波形如图 19 所示，电压跌落情况符合理论分析结果。

当启动二次控制时，直流电压跌落得以补偿，如图 20 所示。在二次控制的作用下，直流母线电压较其参考值的误差约为 0.2%，直流母线电压质量得以保证。同样设置直流侧负载电阻从 400Ω 跳变为 133Ω ，直流母线电压的暂态波形如图 21 所示。从图中可以看出，直流母线电压的抗扰性得以保证。同样，为了验证第二层控制的低带宽通信特性，DA 输出公共二次 PI 控制器的输出波形，如图 22 所示。从图中可以看出，在低带宽通信的影响下，二次 PI 控制器输出阶梯状波形。尽管如此，直流电压的补偿功能仍然可以得到保证。

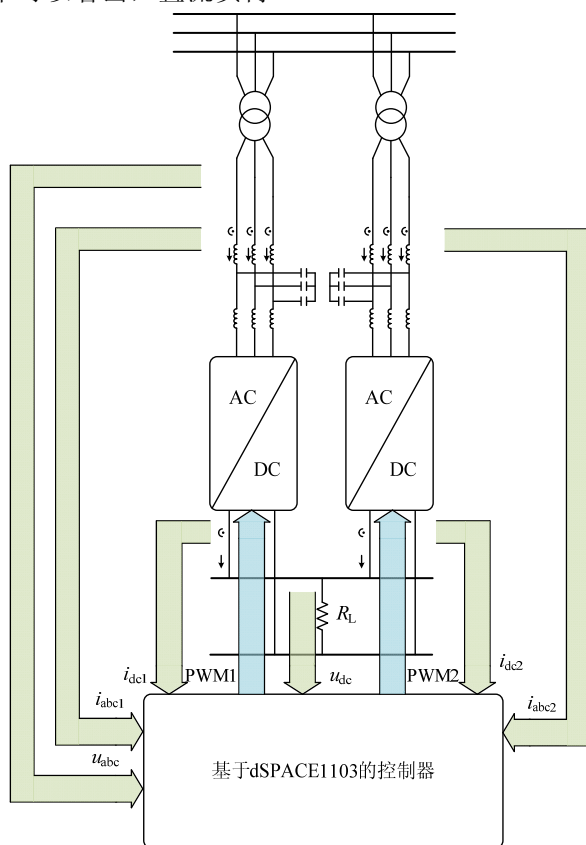


图 15 并联变换器样机结构

Fig.15 Prototype structure of the parallel converters

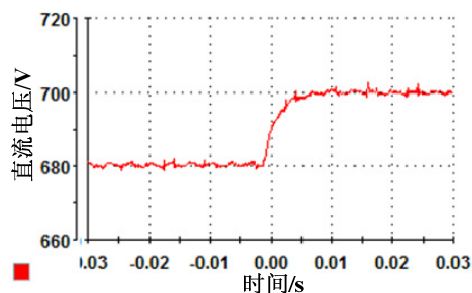


图 16 直流电压给定值跳变波形
Fig.16 DC voltage step reference waveform

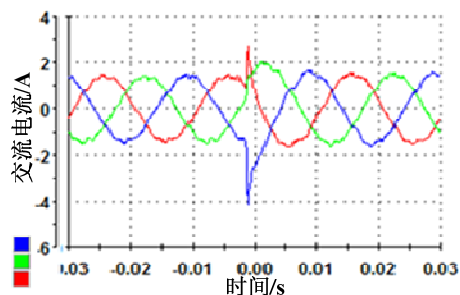


图 17 直流电压给定值跳变情况下交流电流暂态波形
Fig.17 AC current transient waveform with step DC voltage reference

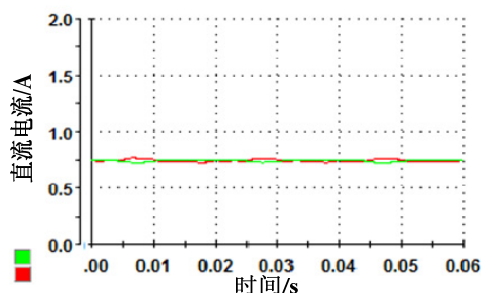


图 18 当启动下垂控制时本地直流侧输出电流波形
Fig.18 Local DC output current with droop control

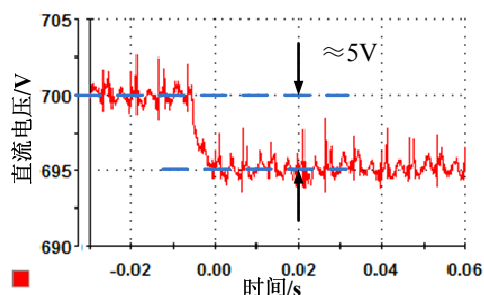


图 19 下垂控制造成直流母线电压跌落波形
Fig.19 DC voltage deviation caused by droop control

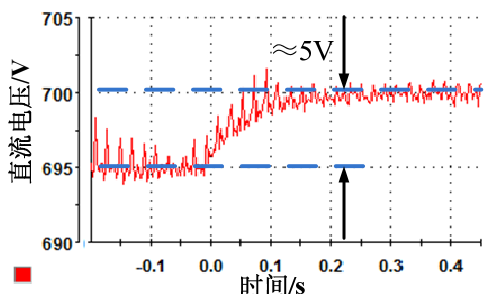


图 20 利用二次控制补偿直流母线电压跌落波形
Fig.20 DC voltage restoration by secondary control

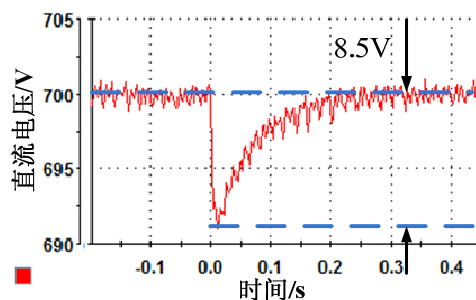


图 21 负载扰动下直流母线电压的暂态波形
Fig.21 DC voltage transient waveform with load disturbance

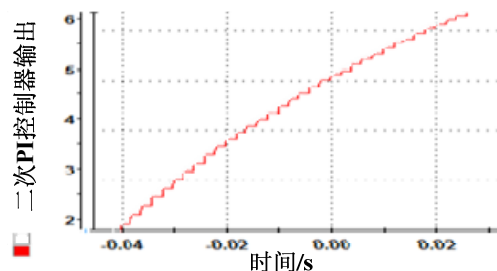


图 22 二次 PI 控制器输出波形
Fig.22 Output waveform of secondary PI controller

4. 结论

为了实现交直流混合微电网系统中直流侧负荷在各分布式接口变换器之间的合理分配,同时对直流母线电压跌落进行补偿,本文提出了直流分层控制系统。具体来讲,在第一层控制中,实现了对本地直流电压和交流电流的控制。同时,利用下垂控制方法,实现交直流混合微电网系统中直流侧负荷在各并联接口变换器之间的均等分配。在第二层控制中,利用具有低带宽特点的公共二次控制器,补偿下垂控制造成的直流母线电压跌落,以提升母线电压质量。经过理论推导可以看出,公共二次控制具有低带宽特点。在通信带宽低至接近工频时,二次控制仍具有良好的补偿效果,可以控制直流母线电压误差小于 0.2%。本文通过仿真和实验方法,验证了所提出的直流分层控制系统的运行性能。在满足电压电流控制要求的基础上,实现直流负荷均流和对直流母线电压跌落的补偿。

参考文献

- [1] 王飞,余世杰,苏建徽,沈玉梁. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报,2005,20(5):72-74, 91.
Wang Fei, Yu Shijie, Su Jianhui, Shen Yuliang. Research on Photovoltaic Grid-Connected Power System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 72-74, 91.
- [2] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学

- 报,2008,23(1):129-136.
- Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende. Operation and Control of AC-Exited Variable-Speed Constant-Frequency Wind Power Generation System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 129-136.
- [3] 陈达威,朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报,2010,25(7):117-122, 143.
- Chen Dawei, Zhu Guiping. Power Transmission Characteristics of Low Voltage Microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7):117-122, 143.
- [4] ChrisMarnay, Owen C. Bailey.The CERTS microgridand the future of the microgrid [C].ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2004.
- [5] X. Liu, P. Wang, P. C. Loh. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control [J].IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 278-286, 2011.
- [6] 刘增,刘进军. 一种可实现分布式发电系统平滑切换的三相逆变器控制方法 [J]. 电工技术学报,2011,26(5):52-61.
- LiuZeng, Liu Jinjun. A Control Method for 3-Phase Inverters Enabling Smooth Transferringof the Operation Modes of Distributed Generation System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 52-61.
- [7] 沈坤,章兢,王坚. 基于 PQ 下垂控制逆变器并联技术的列车辅助供电系统研究[J]. 电工技术学报,2011,26(7):223-229.
- Shen Kun, Zhang Jing, Wang Jian. Research on Train Auxiliary Power System Based on PQ Droop Control Inverter Parallel Technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 223-229.
- [8] J. M. Guerrero, L. Hang, J. Uceda.Control of distributed uninterruptible power supply systems [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 8, pp. 2845-2859, 2008.
- [9] A.P. Martins, A.S. Carvalho, A.S. Araújo.Design and implementation of a current controller for the parallel operation of standard UPSs [C]. IEEE IECON, 1995, pp. 584-589.
- [10] J. Rajagopalan, K. Xing, Y. Guo, F.C. Lee, Modeling and dynamic analysis of paralleled dc/dc converters with master-slave current sharing control [C].APEC, 1996, pp.678-684.
- [11] T.F. Wu, Y.K. Chen, Y.H. Huang. 3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution [J].IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.47, No.2, pp.273-281, 2000.
- [12] X. Sun, Y.S. Lee, D.H. Xu. Modeling, Analysis, and Implementation of Parallel Multi-Inverter Systems with Instantaneous Average-Current-Sharing Scheme [J]. IEEE Trans. Power Electron., Vol.18, No.3, pp. 844-856, 2003.
- [13] IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, IEEE Standard 519, 1992.